

Hydraulický výzkum manipulačního objektu suché nádrže

Martin HLADÍK, Jan BUCHLÁK, Martin KRÁLÍK

1 Úvod

Článek se zabývá vyhodnocením měření na fyzikálním modelu manipulačního objektu suché retenční nádrže. Tento objekt byl postaven v měřítku 1:20, jako modifikovaná verze modelu VD Mělčany. Měření bylo uskutečněno na několika variantách s různými manipulacemi.

Ze změřených přepadových výšek a průtoků byly stanoveny konsumční křivky, a z nich poté byly vypočteny součinitele přepadu, respektive součinitele výtoku otvorem. Dále byly měřeny rychlosti v korytě za vývarem, ze kterých bylo sestaveno rychlostní pole. Díky tomu bylo možno posoudit možnosti a účinek tlumení kinetické energie vody a navrhnout opevnění koryta.

2 Metodika

Teoretické výpočty

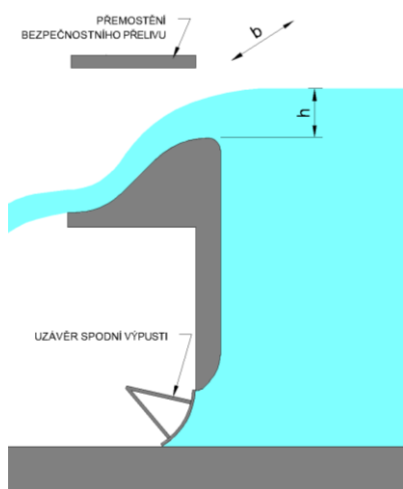
Předmětem úlohy bylo řešení hydraulických jevů, jež jsou přepad a výtok otvorem. S přepadem se setkáváme při převádění velkých vod přes bezpečnostní přeliv. S výtokem otvorem pak u spodních výpustí.

Přepad

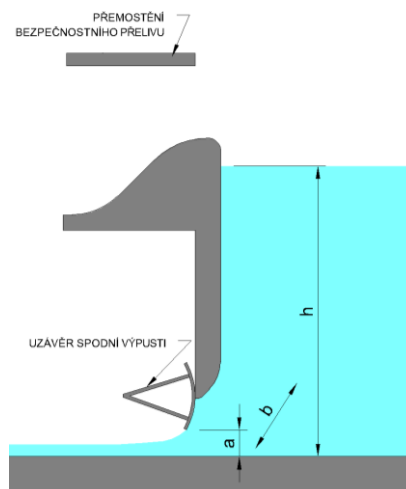
Tvar konstrukce bezpečnostního přelivu svým tvarem odpovídá proudnicové přelivné ploše. Byla uvažována *Scimemiho přelivná plocha* a podle [1] byl odhadnut součinitel přepadu $m = 0,504$. Rovnicí přepadu (1) byla vypočtena teoretická konsumční křivka bezpečnostního přelivu.

$$Q = mb_0 \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

kde	m	...je součinitel přepadu	[-]
	b_0	...je účinná šířka přepadu	[m]
	g	...je tíhové zrychlení	[m s ⁻¹]
	h	...je přepadová výška	[m]



Obrázek 1 – Schéma pro výpočet přepadu



Obrázek 2 – Schéma pro výpočet výtoku otvorem

Výtok otvorem

Spodní výpusti jsou osazeny dvěma druhy uzávěrů. Jedna je vybavena stavidlem a dvě jsou hrazeny segmenty. Vypočteny byly tři konsumční křivky podle rovnice výtoku otvorem (2). Výtokový součinitel μ_v je komplexní a zohledňuje místní ztráty (součinitel ζ), součinitel zúžení (ε) a Coriolisovo číslo (α). Výtokový součinitel je vyjádřen rovnicí (3) a rychlostní součinitel rovnicí (4).

$$Q = \mu_v a b \sqrt{2gz} \quad (2)$$

kde	μ_v	...je výtokový součinitel	[-]
	a	...je výška otvoru (otevření) spodní výpusti	[m]
	b	...je šířka otvoru spodní výpusti	[m]
	g	...je tíhové zrychlení	[m s ⁻¹]
	z	...je vzdálenost těžiště otvoru ke hladině	[m]

$$\mu_v = \varepsilon \varphi \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \quad (4)$$

Součinitele byly podle [1] stanoveny pro stavidlo $\mu_v = 0,70$ a pro segmenty $\mu_v = 0,65$.

Měření na fyzikálním modelu

Základním předpokladem pro fyzikální modelování je teorie mechanické podobnosti. Pomocí ní jsou odvozeny zákony podobnosti umožňující převod z modelu měřených veličin do skutečného měřítka. Pro model s volnou hladinou nejlépe vyhovuje Froudovo kritérium, které uvažuje převažující vliv gravitačních sil nad silami odporovými. Podle něj jsou kinematicky podobné jevy podobné také dynamicky pokud se v příslušných bodech ve skutečnosti i na modelu shodují jejich Froudova čísla. [2]

Nepřevýšený fyzikální model byl postaven v hydraulické laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Geometrické měřítko bylo zvoleno 1:20. Z něho jsou určena další měřítka:

Geometrické měřítko	$M_L = M_B = M_H = 20$
Měřítka rychlostí	$M_v = M_L^{\frac{1}{2}} = 20^{\frac{1}{2}} = 4,47$
Měřítka průtoků	$M_Q = M_L^{\frac{5}{2}} = 20^{\frac{5}{2}} = 1\,789$

Popis modelu

Fyzikální model se skládá z uklidňovací nádrže, modelu manipulačního objektu s bezpečnostním přelivem, spodními výpustmi, vývarem s částí koryta a odpadu.

Manipulační objekt je vybaven přímým nehrazeným bezpečnostním přelivem s přelivnou hranou délky 15,1 m. Dále je manipulační objekt vybaven migrační propustí o rozměrech otvoru 6,6 x 1,5 m, umožňující migraci vodních i terestriálních živočichů. Migrační propust je opatřena stavidlovým uzávěrem. K manipulacím s vodou v nádrži slouží dvě spodní výpusti s otvory o rozměrech 2,50 x 2,25 m. Spodní výpusti jsou hrazeny segmentovými uzávěry.

Popis měření

Měření probíhala za ustáleného stavu. Horní okrajová podmínka byla nastavena průtokem, dolní okrajová podmínka pak hladinou v korytě pod vodním dílem.

Průtok byl nastavován uzavíráním šoupěte a měřen podle magneticko-indukčního průtokoměru. Měřena byla hladina v nádrži. Měření bylo prováděno pomocí posuvného měřítka s přesností na 0,1 mm. Dále bylo měřeno rychlostní pole v korytě v profilu za vývarem. Rychlosti byly měřeny hydrometrickými

vrtulkami opatřenými dataloggerem. Měřeno bylo v roztečích vodorovně 94 mm a svisle 20 mm, s počátečním měřením 10 mm nade dnem. Vznikla pravoúhlá matice rychlostí.

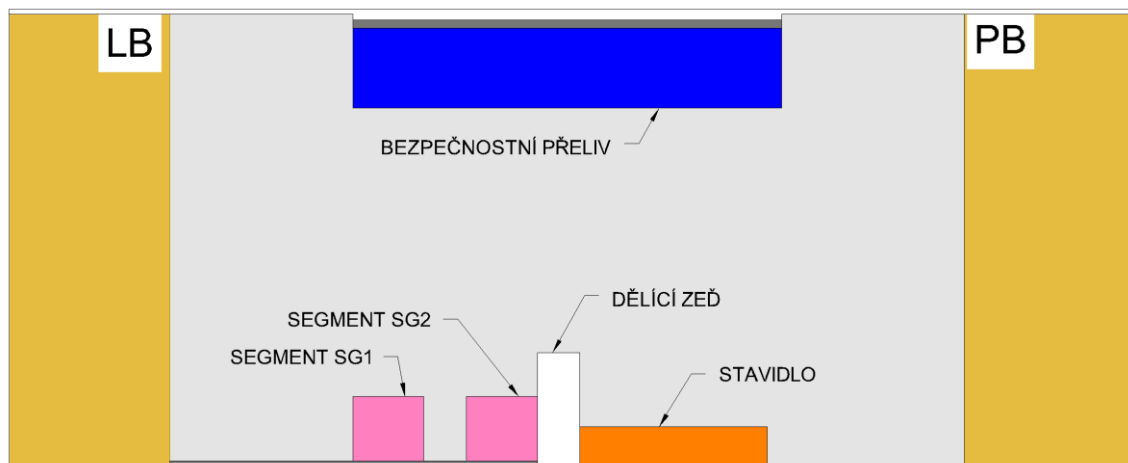


Obrázek 3 – Fyzikální model

Každé měření sestávalo ze série 10 ustálených stavů. Nejprve bylo manipulacemi se šoupětem dosaženo kóty maximální hladiny vody v nádrži. Po ustálení byl zjištěný průtok rovnoměrně rozdělen na 10 dílů a v tomto kroku byly následně průtoky dále snižovány. Po ustálení byla odečtena výška hladiny v nádrži a změřeno rychlostní pole.

3 Měření

Pro přehlednost byly nadále spodní výpusti označovány podle jejich uzávěrů, tj. jako „SG1“ a „SG2“ (segmenty), a „Stavidlo“. Měření M1 až M24 byla prováděna na objektu ve variantě A – viz schéma na Obrázku 4.



Obrázek 4 – Schéma varianty A (pohled po vodě)

Měření M1 + M2

V tomto měření byly uzavřeny spodní výpusti (stavidlo i oba segmenty) a veškeré průtoky byly převáděny přes bezpečnostní přeliv.

Měření M3 + M4

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny prostřední spodní výpustí „SG2“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

Měření M5 + M6

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny prostřední spodní výpustí „SG2“. Nastaveno bylo otevření 2/3.

Měření M7 + M8

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny prostřední spodní výpustí „SG2“. Nastaveno bylo otevření 1/3.

Měření M9 + M10

Měřeno bylo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny levou spodní výpustí „SG1“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

Měření M11 + M12

Měřeno bylo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny levou spodní výpustí „SG1“. Nastaveno bylo otevření 2/3.

Měření M13 + M14

Měřeno bylo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny levou spodní výpustí „SG1“. Nastaveno bylo otevření 1/3.

Měření M15 + M16

Bylo měřeno se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny pravou spodní výpustí „Stavidlo“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

Měření M17 + M18

Bylo měřeno se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny pravou spodní výpustí „Stavidlo“. Nastaveno bylo otevření 2/3.

Měření M19 + M20

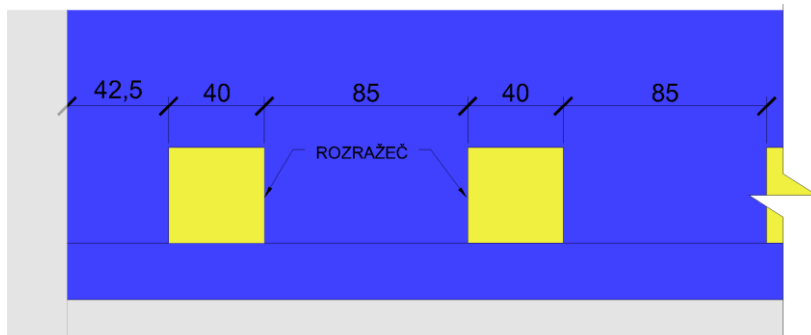
Bylo měřeno se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny pravou spodní výpustí „Stavidlo“. Nastaveno bylo otevření 1/3.

Měření M21 + M22

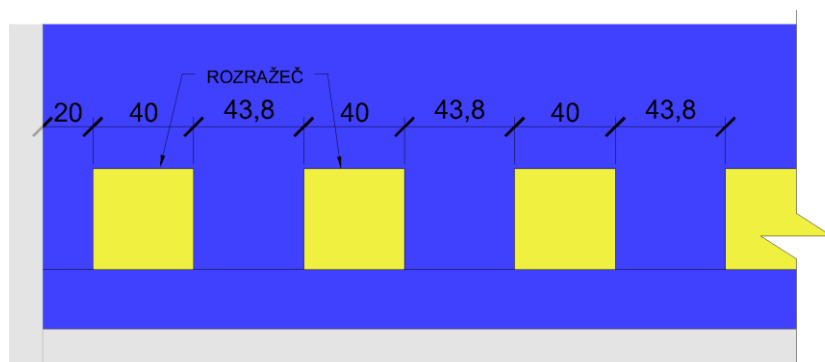
V tomto měření byly uzavřeny spodní výpusti (stavidlo i oba segmenty) a veškeré průtoky byly převáděny přes bezpečnostní přeliv. Bezpečnostní přeliv byl opatřen 6 rozražeči ve vzdálenosti 85 mm – viz schéma na *Obrázku 5*.

Měření M23 + M24

V tomto měření byly uzavřeny spodní výpusti (stavidlo i oba segmenty) a veškeré průtoky byly převáděny přes bezpečnostní přeliv. Bezpečnostní přeliv byl opatřen 10 rozražeči ve vzdálenosti 43,8 mm – viz schéma na *Obrázku 6*.

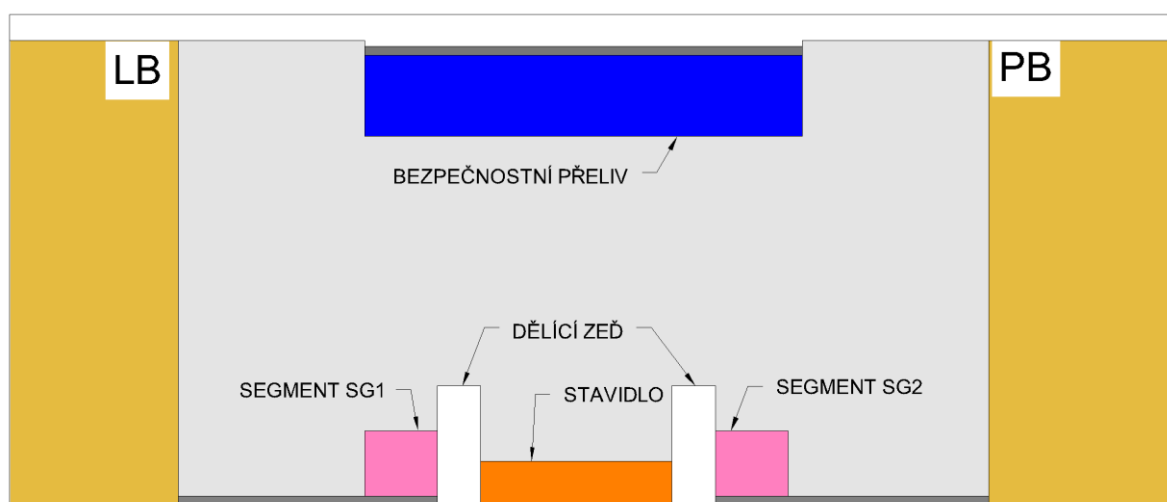


Obrázek 5 – Schéma umístění rozražečů (varianta I.)



Obrázek 6 – Schéma umístění rozražečů (varianta II.)

Pro další série měření (M25 až M34) byl model přestavěn do varianty B. Spodní výpusti byly umístěny symetricky, tj. stavidlo uprostřed a segmenty na krajích. Přestavbu viz *Obrázek 7*.



Obrázek 7 – Schéma varianty B – pohled po vodě

Měření M25 + M26

V tomto měření byly uzavřeny spodní výpusti (stavidlo i oba segmenty) a veškeré průtoky byly převáděny přes bezpečnostní přeliv. Bezpečnostní přeliv byl opatřen 10 rozražeči ve vzdálenosti 43,8 mm – viz schéma na *Obrázku 6*.

Měření M27 + M28

Pro měření byly uzavřeny spodní výpusti (stavidlo i oba segmenty) a veškeré průtoky byly převáděny přes bezpečnostní přeliv. Z bezpečnostního přelivu byly odstraněny rozražeče.

Měření M29 + M30

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny pravou spodní výpustí „SG2“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

Měření M31 + M32

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny prostřední spodní výpustí „Stavidlo“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

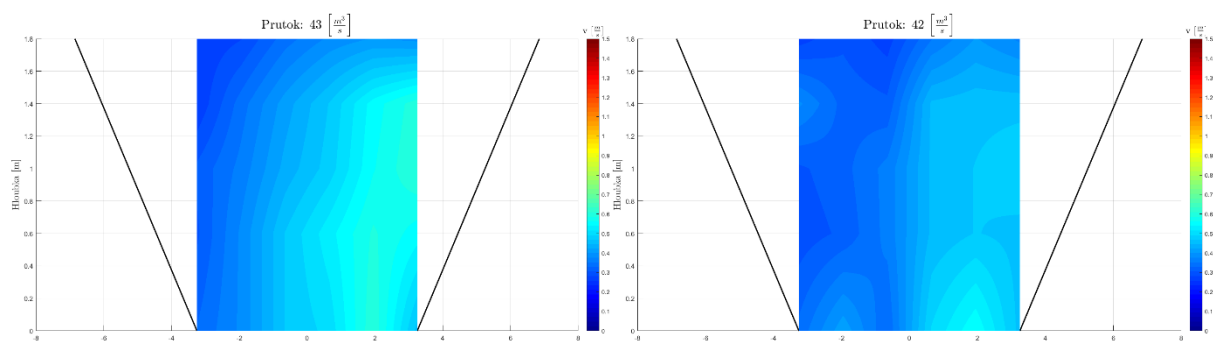
Měření M33 + M34

Měření probíhalo se zahrazeným bezpečnostním přelivem. Průtoky byly převáděny levou spodní výpustí „SG1“. Nastaveno bylo plné otevření (3/3).

4 Vyhodnocení měření

Porovnání měření M2 a M22

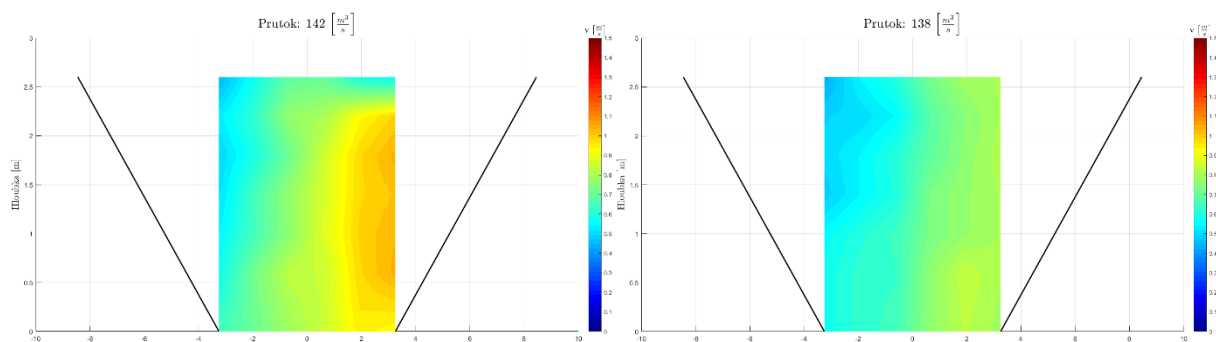
Průtoky byly převáděny bezpečnostním přelivem. V M22 byl oproti M2 bezpečnostní přeliv opatřen rozražeči ve variantě I (viz *Obrázek 5*). Porovnáním rychlostních polí docházíme k závěru, že účinek rozražečů se projevuje již při nižších průtocích. Následující *Obrázek 8* ukazuje snížení rychlostí v pravé části koryta z hodnot přesahujících $0,6 \text{ m s}^{-1}$ na hodnoty pod $0,5 \text{ m s}^{-1}$.



Obrázek 8 – Porovnání rychlostních polí měření M2 (vlevo) a M22 (vpravo)

Porovnání měření M2 a M24

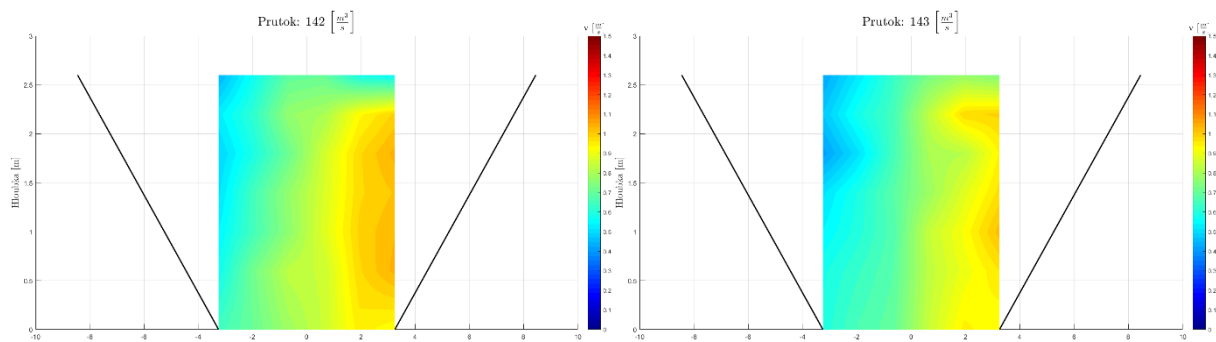
Průtoky byly převáděny bezpečnostním přelivem. V M24 byl oproti M2 bezpečnostní přeliv opatřen rozražeči ve variantě II (viz *Obrázek 6*). Porovnáním rychlostních polí docházíme k závěru, že účinek rozražečů se projevuje již při nižších průtocích a nejlépe je viditelný při maximálním průtoku (cca $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Následující *Obrázek 9* ukazuje snížení v pravé části koryta z hodnot přesahujících $1,0 \text{ m s}^{-1}$ na hodnoty okolo $0,8 \text{ m s}^{-1}$.



Obrázek 9 – Porovnání rychlostních polí měření M2 (vlevo) a M24 (vpravo)

Porovnání měření M2 a M28

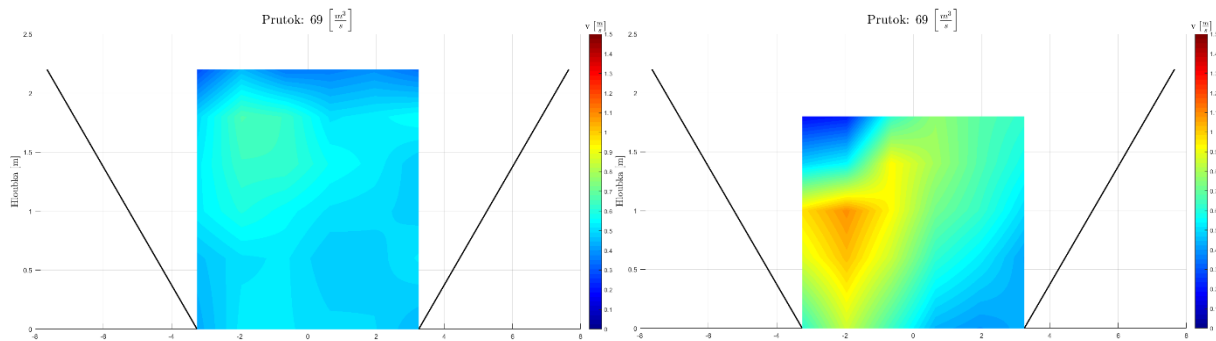
Průtoky byly převáděny bezpečnostním přelivem. Před M28 byl oproti M2 model přestavěn do varianty B (viz *Obrázek 7*). Porovnání rychlostních polí při maximálním průtoku (cca $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) poukazuje na možný mírný účinek dvou betonových zdí, z hlediska tlumení kinetické energie vody. Následující *Obrázek 8* ukazuje snížení rychlostí v pravé části koryta z hodnot přesahujících $0,6 \text{ m s}^{-1}$ na hodnoty pod $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Nutno dodat, že se může jednat i o stav, ve kterém pouze došlo k posunutí lokace nejvyšších rychlostí do části profilu, ve které nebylo prováděno měření. Porovnání ukazuje *Obrázek 10*.



Obrázek 10 – Porovnání rychlostních polí měření M2 (vlevo) a M28 (vpravo)

Porovnání měření M10 a M34

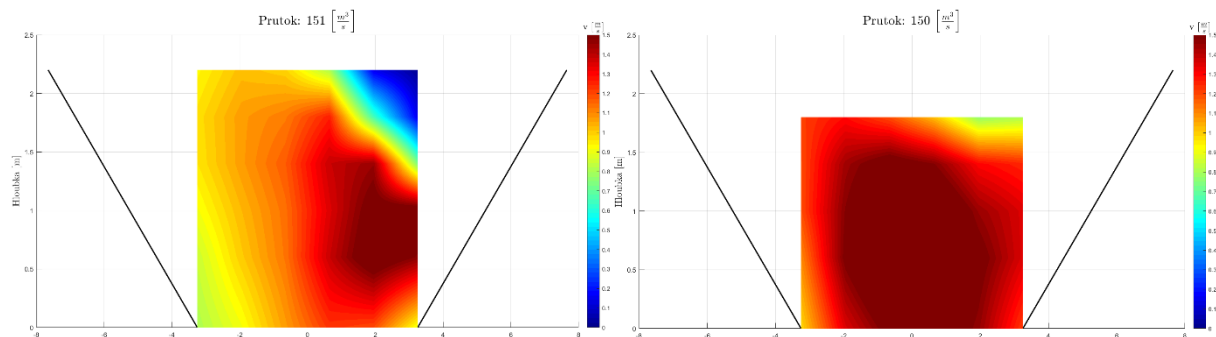
Měření bylo uskutečněno na spodní výpusti se segmentovým uzávěrem „SG1“. Měření M10 probíhalo na variantě A (*Obrázek 4*) a měření M34 na variantě B (*Obrázek 7*). Při stejném průtoku je patrné podstatné zvýšení rychlostí proudění v levé části koryta oproti variantě A. Na *Obrázku 11* jsou porovnány stavy při průtoku $69 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a plném otevření spodní výpusti „SG1“.



Obrázek 11 – Porovnání rychlostních polí měření M10 (vlevo) a M34 (vpravo)

Porovnání měření M16 a M32

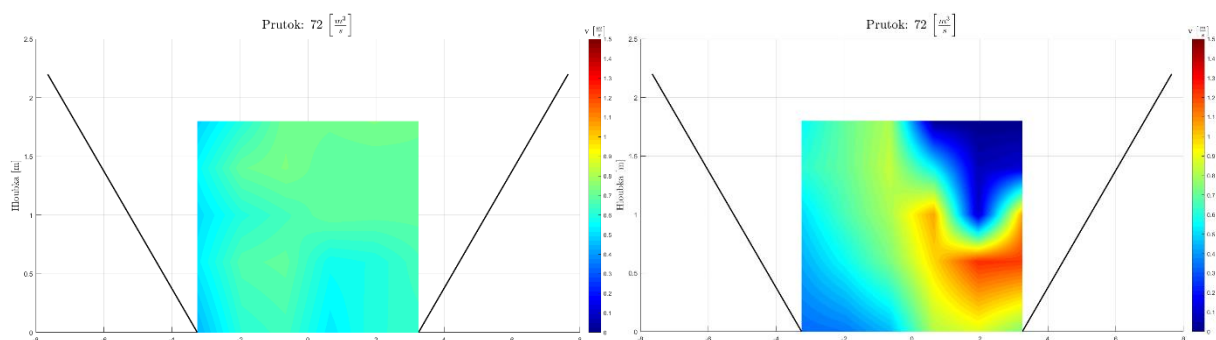
Měření bylo uskutečněno na spodní výpusti se stavidlovým uzávěrem. Měření M16 probíhalo na variantě A (Obrázek 4) a měření M32 na variantě B (Obrázek 7). Při stejném průtoku je patrný vliv dvou rozdělovacích betonových zdí – podstatné zvýšení rychlostí proudění a usměrnění ke středu koryta. Na Obrázku 12 jsou porovnány stavy při průtoku $151 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a plném otevření spodní výpusti „Stavidlo“.



Obrázek 12 – Porovnání rychlostních polí měření M16 (vlevo) a M32 (vpravo)

Porovnání měření M4 a M30

Měření bylo uskutečněno na druhé spodní výpusti se segmentovým uzávěrem „SG2“. Měření M4 probíhalo na variantě A (Obrázek 4) a měření M30 na variantě B (Obrázek 7). Při stejném průtoku došlo k téměř dvojnásobnému nárůstu rychlostí proudění a jeho centralizaci k pravé části koryta oproti variantě A. Na Obrázku 13 jsou porovnány stavy při průtoku $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a plném otevření spodní výpusti „SG2“.



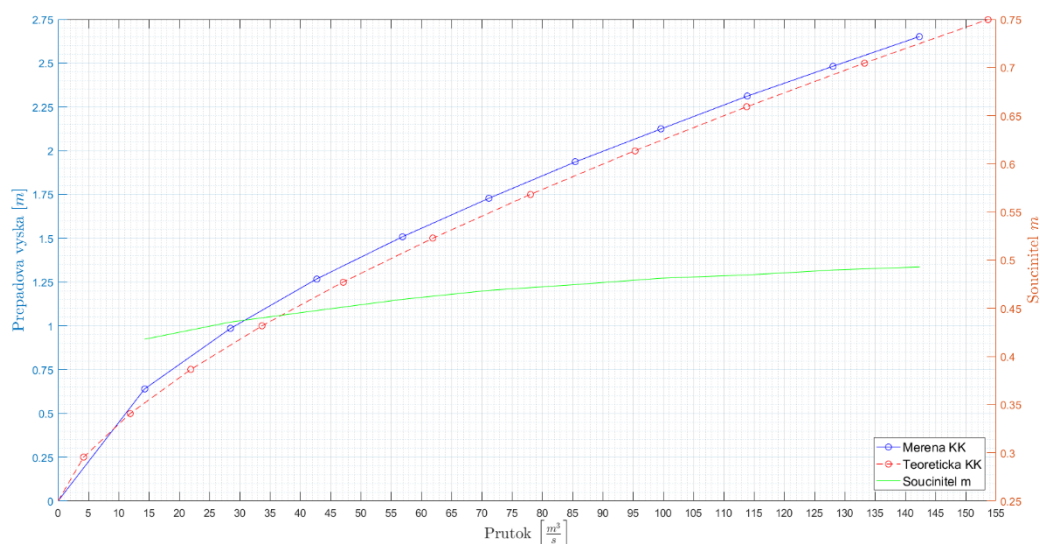
Obrázek 13 – Porovnání rychlostních polí měření M4 (vlevo) a M30 (vpravo)

Konsumční křivky

V části „2 Metodika“ je uveden výpočet konsumční křivky. Z měření na fyzikálním modelu byly sestaveny skutečné konsumční křivky. Následně byly iterativním postupem s užitím metody nejmenších čtverců pro různé přepadové, respektive tlačné výšky, odvozeny různé součinitele přepadu, respektive výtoku.

Konsumční křivka bezpečnostního přelivu

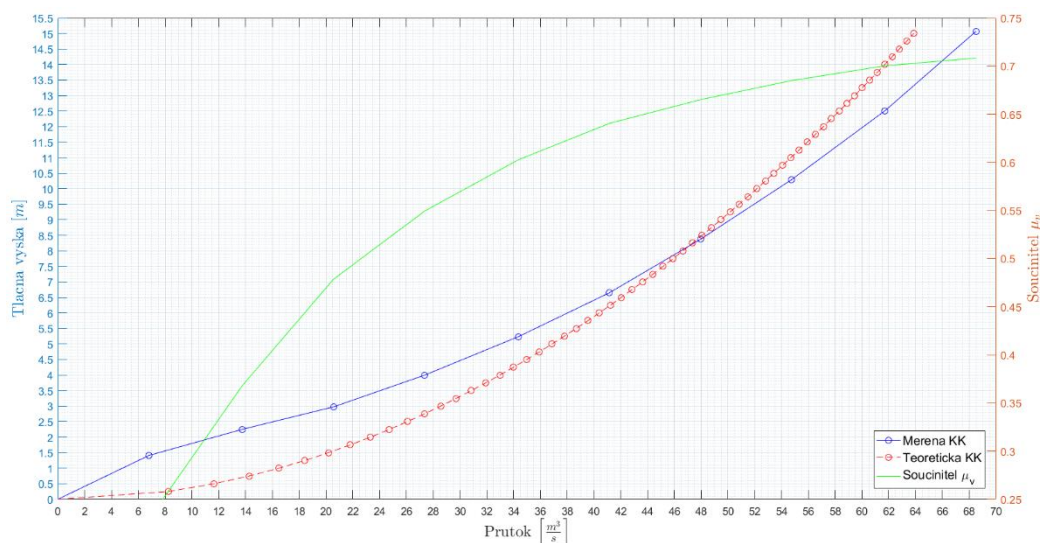
Teoretický výpočet se jeví jako celkem výstižný. Měření však došlo ke zpřesnění a především ke stanovení závislosti součinitele přepadu m na přepadové výšce (závislost patrná z Obrázku 14).



Obrázek 14 – Porovnání teoretické a měřené konsumční křivky bezpečnostního přelivu

Konsumční křivka spodní výpusti „SG1“

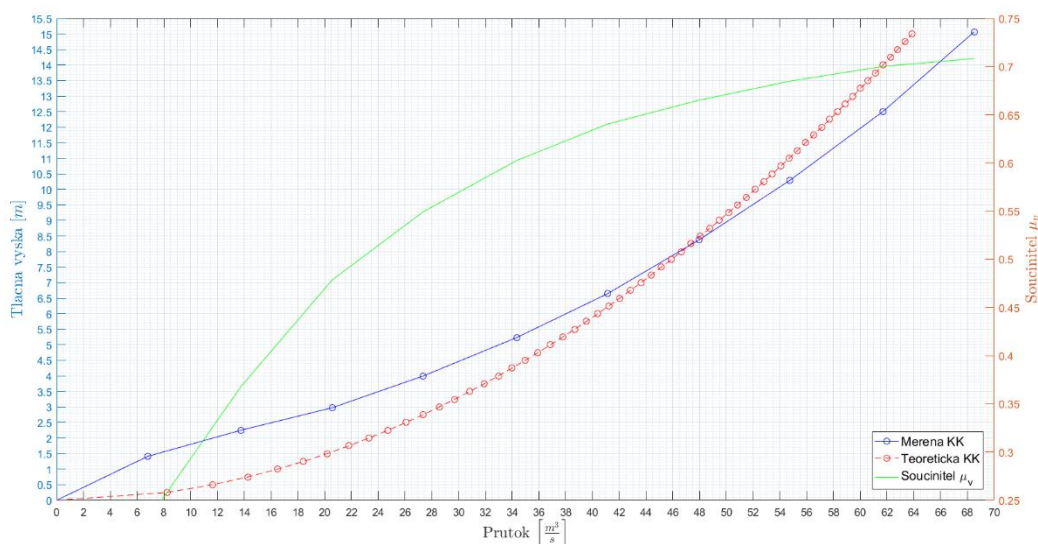
Teoretický výpočet konsumční křivky příliš nevystihuje skutečnost. Měřením byla křivka zpřesněna a byla stanovena závislost součinitele přepadu μ_v na tlačné výšce (porovnání a závislost jsou patrná z Obrázku 15).



Obrázek 15 – Porovnání teoretické a měřené konsumční křivky spodní výpusti „SG1“

Konsumční křivka spodní výpusti „SG2“

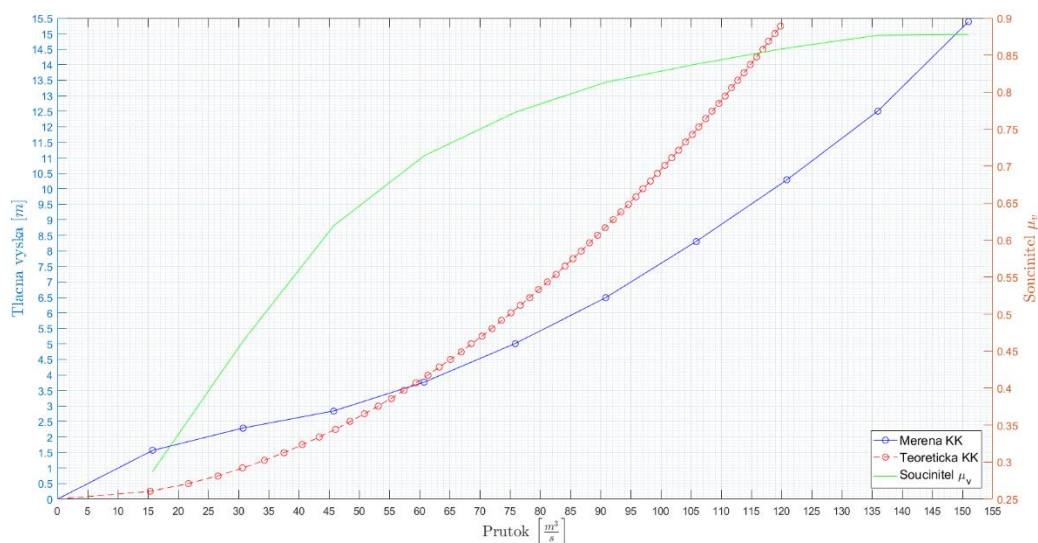
Teoretický výpočet konsumční křivky rovněž příliš nevystihuje skutečnost. Měřením byla křivka zpřesněna a byla stanovena závislost součinitele přepadu μ_v na tlačné výšce (porovnání a závislost jsou patrná z Obrázku 16).



Obrázek 16 – Porovnání teoretické a měřené konsumční křivky spodní výpusti „SG2“

Konsumční křivka spodní výpusti „Stavidlo“

Teoretický výpočet konsumční křivky ani v tomto případě dostatečně nevystihuje skutečnost. Měřením byla křivka zpřesněna a byla stanovena závislost součinitele přepadu μ_v na tlačné výšce (porovnání a závislost jsou patrná z Obrázku 17).



Obrázek 17 – Porovnání teoretické a měřené konsumční křivky spodní výpusti „Stavidlo“

5 Závěr

V rámci výzkumu bylo zkoumáno proudění vody přes manipulační objekt suché nádrže a v korytě za vývarem.

Vyhodnocení měřených veličin poukazuje na účinnost jednotlivých prvků z hlediska tlumení kinetické energie vody. Dále došlo ke zpřesnění konsumčních křivek jednotlivých objektů a ke stanovení empirických součinitelů přepadu a výtoku otvorem. Odchylka mezi měřeními a vypočtenými průtoky dosahovala u bezpečnostního přelivu necelého 1 %. U výtoků pod segmentovými uzávěry byly

maximální odchylky do 8 %. U stavidla se reálně měřený průtok od teoreticky vypočteného lišil až o 20 %. Z těchto hledisek se jeví hydraulický výzkum jako opodstatněný a účelný.

Poděkování:

Příspěvek vznikl za podpory projektu SGS18/054/OHK1/1T/11 „Kombinovaný výzkum proudění vody na hydrotechnických stavbách“.

6 Literatura

1. **KOLÁŘ, Václav, Cyril, PATOČKA a Jiří, BÉM.** *Hydraulika*. Praha : SNTL, 1983. L17-C3-V-41/78 115.
2. **ČÁBELKA, J., P. GABRIEL.** *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (I) Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti*. Praha : Academia, 1987.
3. **Sweco Hydroprojekt a. s.** Dědina, Mělčany, suchá retenční nádrž. *Projektová dokumentace*. 2015.